

# Riegos de gravedad y a presión

**Bernardo Pascual España**  
**Núria Pascual Seva**

**4ª edición**



Bernardo Pascual España  
Núria Pascual Seva

# Riegos de gravedad y a presión

4ª edición

*Colección Académica*

Para referenciar esta publicación utilice la siguiente cita: Pascual España, B.; Pascual Seva, N. (2020). *Riegos de gravedad y a presión* (4ª ed.). Valencia: Editorial Universitat Politècnica de València

© Bernardo Pascual España  
Núria Pascual Seva

© 2020, Editorial Universitat Politècnica de València  
Venta: [www.lalibreria.upv.es](http://www.lalibreria.upv.es) / Ref.:0252\_03\_04\_01

Imprime: Byprint Percom, S. L.

ISBN: 978-84-9048-933-8  
Impreso bajo demanda

Si el lector detecta algún error en el libro o bien quiere contactar con los autores, puede enviar un correo a [edicion@editorial.upv.es](mailto:edicion@editorial.upv.es)

La Editorial UPV autoriza la reproducción, traducción y difusión parcial de la presente publicación con fines científicos, educativos y de investigación que no sean comerciales ni de lucro, siempre que se identifique y se reconozca debidamente a la Editorial UPV, la publicación y los autores. La autorización para reproducir, difundir o traducir el presente estudio, o compilar o crear obras derivadas del mismo en cualquier forma, con fines comerciales/lucrativos o sin ánimo de lucro, deberá solicitarse por escrito al correo [edicion@editorial.upv.es](mailto:edicion@editorial.upv.es)

Impreso en España

# ÍNDICE

<b>CAPÍTULO I: FUNDAMENTOS DEL RIEGO.....</b>	<b>1</b>
1. INTRODUCCIÓN .....	3
1.1. Evolución del regadío en la antigüedad .....	3
1.2. Definición de riego .....	10
1.3. Extensión del regadío .....	11
1.4. Información básica necesaria para proyectar una puesta en riego .....	11
1.4.1. Mapas.....	12
1.4.2. Recursos de agua de la explotación.....	12
2. EL SUELO COMO DEPÓSITO DE AGUA.....	14
2.1. Disponibilidad de agua en el suelo .....	14
2.2. Potencial hídrico del suelo .....	18
2.3. Factores que afectan a la retención de agua .....	22
2.4. Histéresis.....	24
2.5. Medición del potencial hídrico y del contenido de agua del suelo .....	25
3. PROFUNDIDAD DE ENRAIZAMIENTO.....	28
4. UMBRAL ÓPTIMO DE RIEGO.....	35
5. INFILTRACIÓN.....	39
5.1. Ecuaciones de la infiltración .....	41
5.2. Medida de la infiltración.....	59
5.3. La conductividad hidráulica y su determinación .....	62
6. NECESIDADES DE RIEGO. CAUDAL FICTICIO CONTINUO Y CAUDAL CARACTERÍSTICO .....	67
6.1. Necesidades de riego.....	67
6.2. Caudal ficticio continuo y caudal característico .....	69
7. PARÁMETROS DE RENDIMIENTO DEL RIEGO.....	70
7.1. Eficiencia de riego .....	71
7.2. Evaluación de los sistemas de riego.....	77

7.2.1. Déficit de humedad.....	77
7.2.2. Déficit permisible de humedad.....	77
7.2.3. Eficiencia de almacenamiento en el suelo.....	78
7.2.4. Suficiencia referida al 25% de las observaciones más desfavorables.....	78
7.2.5. Uniformidad de riego.....	78
7.2.5.1. Coeficiente de uniformidad de Christiansen.....	79
7.2.5.2. Uniformidad de distribución.....	79
7.2.5.3. Coeficiente estadístico de uniformidad.....	80
8. SALINIDAD, REQUERIMIENTO DE LIXIVIACIÓN.....	80
9. ELECCIÓN DEL MÉTODO DE RIEGO.....	85
<b>CAPÍTULO II: DISTRIBUCIÓN DEL AGUA EN LOS REGADÍOS.....</b>	<b>89</b>
1. INTRODUCCIÓN.....	91
2. CAUDAL DE DERIVACIÓN.....	91
3. DISTRIBUCIÓN DEL AGUA.....	97
3.1. Distribución continua.....	97
3.2. Distribución por rotación o turno.....	99
3.3. Distribución a la demanda.....	100
4. CAUDAL DE LAS CONDUCCIONES.....	101
4.1. Distribución por rotación.....	101
4.2. Distribución a la demanda.....	102
4.2.1. Valores normales de los parámetros.....	106
4.2.1.1. Rendimiento de empleo.....	106
4.2.1.2. Calidad de funcionamiento.....	106
4.2.2. Aumento relativo de caudal.....	106
5. EL TRIBUNAL DE LAS AGUAS DE LA VEGA DE VALENCIA.....	108

<b>CAPÍTULO III: RIEGOS DE GRAVEDAD O SUPERFICIE .....</b>	<b>115</b>
1. INTRODUCCIÓN .....	117
2. HIDRÁULICA DEL RIEGO POR SUPERFICIE.....	121
2.1. Introducción .....	121
2.2. Fases de un riego típico de superficie .....	124
3. RIEGO A MANTA.....	131
3.1. Riego por tablares .....	132
3.1.1. Condiciones que favorecen la instalación del riego por tablares .....	132
3.1.1.1. Cultivos .....	132
3.1.1.2. Suelos .....	132
3.1.1.3. Pendientes .....	133
3.1.1.4. Ventajas.....	134
3.1.1.5. Inconvenientes.....	134
3.1.2. Diseño de tablares con salida del agua al pie.....	134
3.1.2.1. Caudal unitario .....	135
3.1.2.2. Tiempo de aplicación .....	136
3.1.2.3. Longitud del tablar .....	136
3.1.2.4. Limitaciones en el diseño.....	136
3.1.3. Diseño de tablares con retención de agua al pie .....	145
3.1.3.1. Bloqueo de la salida y aumento de la longitud.....	146
3.1.3.2. Bloqueo de la salida y reducción del caudal .....	147
3.1.3.3. Ejemplo de cálculo. Diseño de tablares .....	140
3.2. Riego por sumersión .....	150
3.2.1. Condiciones que favorecen la instalación del riego por sumersión .....	151
3.2.1.1. Cultivos .....	152
3.2.1.2. Suelos .....	152
3.2.1.3. Ventajas.....	152
3.2.1.4. Inconvenientes.....	152
3.2.2. Diseño .....	152
3.2.2.1. Limitaciones del diseño.....	153
3.2.2.2. Método del SCS .....	154
3.2.2.3. Método empírico de Booher.....	163
3.2.2.4. Riego continuo o permanente.....	166
3.3. Riego por desbordamiento natural .....	176

4. RIEGO POR SURCOS .....	177
4.1. Condiciones que favorecen la instalación del riego por surcos.....	177
4.1.1. Cultivos.....	177
4.1.2. Suelos.....	178
4.1.3. Pendientes .....	178
4.1.4. Ventajas .....	179
4.1.5. Inconvenientes .....	179
4.2. Diseño .....	180
4.2.1. Surcos en pendiente y con salida de agua al pie .....	185
4.2.2. Ejemplo de cálculo. Diseño de surcos en pendiente y con salida al pie.....	191
4.2.3. Surcos en pendiente con reducción de caudal .....	193
4.2.4. Ejemplo de cálculo. Diseño de surcos en pendiente con reducción de caudal .....	197
4.2.5. Surcos nivelados y con retención del agua al pie .....	200
4.2.6. Ejemplo de cálculo. Diseño de surcos nivelados y con retención del agua al pie.....	203
 5. APLICACIÓN DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS EN LOS PROGRAMAS INFORMÁTICOS.....	204
5.1. WinSRFR .....	210
5.2. Utilización del programa WinSRFR en la modelización y diseño del riego por surcos en L'Horta de València .....	212
 6. CASOS ESPECIALES .....	213
6.1. Riego por surcos a pulsos .....	213
6.2. Riego por surcos con sistema de cable .....	215
6.3. Surcos en contorno .....	216
6.4. Surcos en zigzag .....	217
6.5. Riego por alcorques .....	218
 <b>CAPÍTULO IV: RIEGO POR ASPERSIÓN .....</b>	<b>221</b>
1. INTRODUCCIÓN .....	223
2. VENTAJAS E INCONVENIENTES DEL RIEGO POR ASPERSIÓN .....	223
2.1. Ventajas .....	223
2.2. Inconvenientes .....	224

---

3. COMPONENTES DE LOS SISTEMAS DE ASPERSIÓN .....	224
3.1. Grupo de bombeo.....	226
3.2. Conducciones.....	226
3.2.1. Conducciones móviles.....	227
3.2.2. Conducciones fijas.....	228
3.2.2.1. Materiales plásticos.....	228
3.2.2.2. Fibrocemento.....	229
3.2.2.3. Hormigón armado y pretensado .....	229
3.2.2.4. Acero y fundición.....	229
3.3. Aspersores.....	229
3.3.1. Aspersores rotativos.....	230
3.3.1.1. Introducción .....	230
3.3.1.2. Clasificaciones de los aspersores rotativos .....	234
3.3.1.3. Espaciamiento de los aspersores: Distribución del agua y tamaño de las gotas; efecto del viento en la distribución del agua.....	238
3.3.1.4. Pérdidas por evaporación .....	248
3.3.1.5. Pluviometría .....	252
3.3.1.6. Coeficiente de uniformidad de la aplicación de agua...	257
3.3.2. Torniquetes hidráulicos .....	260
3.3.3. Aspersores de boquilla fija .....	261
3.3.4. Tuberías perforadas .....	262
4. TIPOS DE SISTEMAS DE ASPERSIÓN.....	264
4.1. Sistemas convencionales.....	265
4.1.1. Sistemas móviles .....	267
4.1.2. Tipos de sistemas convencionales .....	269
4.1.3. Sistemas semifijos .....	270
4.1.2.1. Sistemas móviles.....	264
4.1.2.3. Sistemas semifijos.....	267
4.2. Sistemas mecanizados.....	274
4.2.1. Torniquetes hidráulicos .....	274
4.2.2. Enrolladores.....	277
4.2.3. Alas de riego con desplazamiento .....	282
4.2.3.1. Ala de riego sobre ruedas.....	283
4.2.3.2. Sistemas de pivote central (Pivotes) .....	286
4.2.3.3. Unidad desplazable de avance frontal (Laterales).....	302
4.2.3.4. Tendencias en la actualidad .....	306



5. ELECCIÓN DEL SISTEMA DE ASPERSIÓN .....	306
5.1. Topografía.....	306
5.2. Tipos de suelos.....	307
5.3. Cultivos.....	307
5.4. Mano de obra .....	307
5.5. Forma de la parcela.....	307
5.6. Tendencias .....	308
<b>CAPÍTULO V: RIEGO LOCALIZADO.....</b>	<b>309</b>
1. INTRODUCCIÓN .....	311
2. EVOLUCIÓN HISTÓRICA.....	311
3. VENTAJAS E INCONVENIENTES .....	312
3.1. Ventajas .....	312
3.2. Inconvenientes .....	314
4. SISTEMAS DE RIEGO LOCALIZADO .....	315
5. ESQUEMA DE UNA INSTALACIÓN DE RIEGO LOCALIZADO .....	315
5.1. Cabeza de riego .....	317
5.1.1. Unidad de bombeo.....	317
5.1.2. Equipo de filtrado .....	318
5.1.2.1. Prefiltros.....	321
5.1.2.2. Filtros .....	321
5.1.3. Equipo de fertilización.....	341
5.1.3.1. Tanques de fertilización.....	342
5.1.3.2. Inyector Venturi.....	344
5.1.3.3. Inyectores dosificadores .....	345
5.1.3.4. Elección de los diferentes equipos de fertilización.....	348
5.1.4. Depósitos de abono.....	348
5.1.5. Control de presiones y caudales .....	349
5.1.6. Automatización.....	351
5.2. Red de tuberías.....	357
5.2.1. Tuberías de PVC.....	359
5.2.2. Tuberías de polietileno .....	359

---

5.3. Emisores.....	360
5.3.1. Definiciones.....	360
5.3.2. Requerimientos básicos.....	363
5.3.2.1. Ecuación característica del emisor.....	363
5.3.2.2. Sensibilidad a las variaciones de temperatura.....	367
5.3.2.3. Coeficiente de variación de fabricación.....	368
5.3.2.4. Sensibilidad a las obturaciones.....	372
5.3.2.5. Pérdida de carga en la conexión.....	372
5.3.3. Clasificación de los emisores y tuberías emisoras.....	374
5.3.3.1. Reutilización (tuberías emisoras).....	375
5.3.3.2. Tipo de regulación de la presión.....	375
5.3.3.3. Tipo de funcionamiento a baja presión.....	375
5.3.3.4. Tipo de conexión a la tubería.....	376
5.3.3.5. Tipo de emisor de salida múltiple.....	376
5.3.3.6. Clasificación según su construcción.....	376
5.3.3.7. Clasificación según su hidráulica.....	377
5.3.3.8. Clasificación según el coeficiente de variación de fabricación.....	383
5.3.4. Marcado de tuberías emisoras y de emisores.....	384
5.3.4.1. Tuberías emisoras.....	384
5.3.4.2. Emisores.....	384
5.3.5. Difusores.....	385
5.3.5.1. Clasificación de los difusores.....	386
5.3.5.2. Identificación.....	390
6. DISEÑO AGRONÓMICO.....	390
6.1. Introducción.....	390
6.2. Respuesta de los cultivos al riego localizado.....	391
6.3. Necesidades de agua.....	392
6.3.1. Necesidades netas.....	396
6.3.2. Necesidades totales.....	397
6.3.2.1. Pérdidas por percolación.....	398
6.3.2.2. Requerimiento de lixiviación.....	399
6.3.2.3. Coeficiente de uniformidad.....	399
6.4. Volumen de suelo mojado.....	404
6.4.1. El bulbo húmedo.....	407
6.4.2. Área mojada por un emisor.....	411
6.5. Número de emisores.....	415
6.6. Disposición de los laterales de riego y de los emisores.....	432

7. RIEGO A PULSOS.....	420
8. LA PROGRAMACIÓN DEL RIEGO .....	422
8.1. Métodos de programación de riegos basados en medidas en el suelo ....	422
8.2. Métodos de programación de riegos basados en medidas en la planta ...	423
8.3. Métodos de programación de riegos basados en el balance de hídrico....	424
8.4. Programación en tiempo real .....	425
9. RIEGO DEFICITARIO CONTROLADO.....	426
10. OBTURACIONES .....	426
10.1. Obturaciones físicas.....	427
10.2. Obturaciones químicas.....	429
10.2.1. Carbonato cálcico .....	430
10.2.1.1. Tratamiento preventivo .....	430
10.2.1.2. Tratamiento de limpieza.....	433
10.2.2. Precipitados de hierro y manganeso .....	434
10.2.2.1. Tratamiento preventivo .....	435
10.2.2.2. Tratamiento de limpieza.....	435
10.3. Obturaciones biológicas.....	435
10.3.1. Tratamiento preventivo.....	436
10.3.2. Tratamiento de limpieza .....	438
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS /BIBLIOGRAFÍA .....	439

# CAPÍTULO I

*FUNDAMENTOS DEL RIEGO*

---



## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. EVOLUCIÓN DEL REGADÍO EN LA ANTIGÜEDAD

En la edición anterior de este libro se comentaba la antiquísima utilización del regadío y que la historia de las civilizaciones ha estado ligada a la evolución de la agricultura de regadío. En ella se destacaba el estudio realizado por ISRAELSEN y HANSEN (1979), y se citaba bibliografía que permitía una mayor profundización en la historia del regadío (ICID, 1977; YOUSRY, 1978, KANG, 1972, KOVDA et al., 1973, JENSEN, 1980, WALKER y SKOGERBOE, 1987). Posteriormente han aparecido dos obras muy importantes e interesantes, Historia de la Agronomía del profesor J.V. Maroto (MAROTO, 2014), e Historia General de la Agricultura, del profesor J.I. Cubero (CUBERO, 2019). También merece ser destacado el capítulo titulado *Hydrology of the Nile and Ancient Agriculture* (NOAMAN y EL QUOSY, 2017) del libro *Irrigated Agriculture in Egypt. Past, Present and Future*.

Catorce especialistas de todo el mundo (ANGELAKIS et al., 2020) han realizado recientemente un magnífico estudio basado en fuentes bibliográficas, con el objetivo de proporcionar una visión general de la evolución del riego en todo el mundo, analizando los impactos que las técnicas de riego han tenido en la agricultura de regadío y en la gestión moderna de los recursos hídricos. Fundamentalmente de este documento, aunque no en exclusividad, se extraen las siguientes notas.

Se cree que el conocido como Fértil Creciente, Creciente Fértil o Media Luna Fértil es la cuna de la agricultura, además del lenguaje escrito y de las religiones monoteístas. El término de Media Luna fue introducido por el arqueólogo J. H. Breasted por la forma de media luna que tiene el área geográfica. Es una región histórica que comprendía los territorios conocidos como Mesopotamia, Asiria, Fenicia, y el Bajo y Alto Egipto, ocupando el territorio de los actuales Líbano, Israel, Palestina, Siria, Irak, el sudeste de Turquía, noroeste de Jordania y el valle del Nilo.

Se hipotetiza que el nacimiento del riego también tuvo lugar en el Creciente Fértil, poco después del inicio de la agricultura. Dados los largos períodos sin lluvia en el Fértil Creciente es verosímil que los primeros agricultores desviaran el agua del curso de los ríos a las tierras de cultivo, tan pronto como pudieron.

Aunque las fases iniciales del desarrollo del riego son difíciles de documentar, las prácticas iniciales de riego probablemente consistieron en la simple desviación del agua desde el curso de los ríos hacia las tierras de cultivo adyacentes a los

cursos de agua. Resulta lógico que, tras miles de años, únicamente queden algunos restos físicos de las infraestructuras más resistentes. Las evidencias que se tienen en la actualidad revelan que la agricultura de regadío más antigua en el Creciente Fértil se practicó en Egipto unos 5.000 años a.C. y consistió en grandes cuencas construidas para desviar las inundaciones y producir cultivos a lo largo de las riberas del río Nilo. Posteriormente, este sistema se perfeccionó y dio lugar al conocido actualmente como riego por sumersión o inundación. También se han citado sistemas más avanzados como el abancalamiento y la construcción de parcelas de diferentes tamaños, y de esclusas para regular y dirigir el agua de inundación.

Técnicas similares a las utilizadas en Egipto, con adaptaciones a los ríos Tigris y Éufrates, se utilizaron en Mesopotamia aproximadamente 3.000-5.000 años a.C. Así, el canal que cruzaba la antigua ciudad semítica de Mari, en Mesopotamia, fue utilizado para el riego. Entre los sumerios existían los “*gagullu*”, inspectores de los canales de riego, que vigilaban el buen estado de los canales de riego y de que no se produjeran desviaciones ilegales de los mismos (MAROTO, 2014). Según fuentes citadas por MAROTO (2014), los pozos artesianos existentes en el oasis de Koam, en la zona esteparia de Siria Central, a unos 80 km al norte de Palmira y otros 80 km al sur del Éufrates, datados alrededor de 11.000 años a.C. son posiblemente el ejemplo más antiguo de la utilización del regadío.

En China, las primeras comunidades agrícolas y ganaderas aparecieron a mediados del neolítico, hace unos 7.000 años. En el curso medio y bajo del río Yangtze, donde se podían encontrar abundantes recursos hídricos y terrenos llanos, emergieron arrozales. El hombre comenzó a cultivar arroz en las tierras bajas, cerca de ríos y lagos, lo que condujo al surgimiento de primitivas prácticas de ingeniería de riego y drenaje en el actual Hemudu (provincia de Chekiang). A mediados del neolítico, el hombre comenzó a establecerse en áreas alejadas de los ríos, lo que condujo a la excavación de pozos para riego. Descubrimientos arqueológicos datan los primeros pozos de agua en China en unos 4.000 años a.C., también en Hemudu, aunque en ese período, la utilización de los pozos se limitaba fundamentalmente al riego de patios y jardines.

A lo largo de la historia, el auge y el declive de las civilizaciones que prosperaron en el Creciente Fértil dependieron estrechamente de la utilización del agua en la producción agrícola, que proporcionó prosperidad económica, estabilidad social y poder militar. Los episodios de sequía de larga duración causaron (frecuentemente) el derrocamiento de las dinastías gobernantes y su

sustitución por otras nuevas. También fue en el Creciente Fértil donde aparecieron por primera vez los impactos negativos del riego. La acumulación de sal en el suelo, derivada del uso de aguas de baja calidad y de un drenaje inadecuado, acarrió la salinización del suelo y a la disminución de la producción agrícola. Aunque en esta época ya se daban riegos “de lavado” existieron graves problemas de salinización del suelo que condujeron a sustituir el cultivo del trigo por el de la cebada, por ser ésta más tolerante a la salinidad (MAROTO, 2014).

Las prácticas agrícolas también requerían, además del drenaje, de trabajos como la nivelación del terreno y la protección contra inundaciones. En climas áridos y semiáridos, el mantenimiento de la producción agrícola necesita del riego debido a la escasez o la distribución desigual de las precipitaciones durante el ciclo de cultivo y, por lo tanto, exigía la construcción de instalaciones para el almacenamiento del agua y poder mantener el suministro de agua durante los períodos de riego.

Según el relato bíblico del Génesis (2:10), “De Edén salía un río que regaba el jardín; y desde allí se dividía y se formaban de él cuatro brazos”, de los cuales dos eran los ríos Éufrates y Tigris. El Edén sería el lugar donde Dios puso al hombre después de haberlo creado. Este sitio histórico estaba localizado a unos 40 km al Nordeste de Eridu, donde según la tradición sumeria el dios Marduk había creado el mundo. Se cree que Eridu, es la primera ciudad de la tierra, el primer lugar que se convirtió en una ciudad como resultado del desarrollo de la agricultura de regadío (fotografías 1.1). Los arqueólogos han datado su antigüedad en torno al 4900 a.C. En julio de 2016, la UNESCO confirió al yacimiento arqueológico de Eridu el título de Patrimonio Mixto de la Humanidad, como “parte de los vestigios arqueológicos de asentamientos sumerios en la Baja Mesopotamia, que florecieron entre el tercer y cuarto milenios a.C. en el delta pantanoso formado por los ríos Éufrates y Tigris”.



Fotografías 1.1. Visión idealizada de Eridu (izquierda; <http://nyitarch161.blogspot.com/2016/12/eridu.html>) y yacimiento arqueológico de Eridu en la actualidad (derecha; <http://www.asor.org/anetoday/2017/09/rebuilding-eden-eridu>)



El desarrollo de la agricultura en la Edad del Bronce (c. 3200 - 1100 a.C.) permitió la subsistencia de grandes poblaciones. Existen evidencias de que durante el primer milenio a.C. la productividad agrícola en Europa alcanzó por primera vez niveles capaces de sostener sociedades muy estratificadas. Los inicios de desarrollos agrícolas que condujeron a la creación de civilizaciones clásicas se remontan a las primeras dinastías chinas (c. 5000 a.C.), los antiguos egipcios (c. 3050 - 1550 a.C. hasta 500 a.C.), los estados minoicos de Creta (c. 3200 - 1100 a.C.) y las civilizaciones del valle del Indo (c. 3200 - 1300 a.C.). Además, los mayas y otras civilizaciones precolombinas (c. 2500 a.C. a 1540 d.C.) tuvieron desarrollos similares en América Central y del Sur.

De este período quiere destacarse por su influencia posterior tres apartados: el riego en el antiguo Egipto, el riego en Babilonia y el Código de Hammurabi, y el “*jar irrigation*”.

Los antiguos egipcios desarrollaron sistemas de riego para utilizar el agua del río Nilo. A pesar de que el riego era crucial para su éxito agrícola, no había regulaciones estatales sobre el control del agua, sino que los agricultores locales eran los responsables del riego, regulando el riego cuando los niveles del Nilo eran suficientemente altos durante las inundaciones. La referencia más antigua, y famosa, al riego en Egipto se encuentra en la Cabeza de maza del Rey Escorpión, o Paleta de Narmer (MAROTO, 2014) que data de aproximadamente 3100 a.C., y actualmente se encuentra en el Museo *Asmolean*, en Oxford (fotografía 1.2); en ella aparece el rey Horus Escorpión II llevando una azada en la mano, que se relaciona con la ceremonia de la apertura de una compuerta de riego en una inundación del Nilo.

Los antiguos egipcios, que dependían de las inundaciones anuales del Nilo para cubrir sus campos con limo y regar sus cultivos, midieron el nivel de las inundaciones para determinar sus impuestos, y construyeron canales y presas para que el agua pudiera ser transportada desde el Nilo a áreas distantes, para riego y también para consumo humano. Menes (3000 a. C.), primer rey en gobernar el Egipto unido (el Alto Egipto y el Bajo Egipto), cerró un ramal del Nilo que atravesaba la depresión del Desierto Occidental (que actualmente es un oasis) y amplió y profundizó el ramal que atravesaba el Valle y el Delta, fortaleciendo sus terraplenes para asegurar el agua para la agricultura y también para establecer comunidades y proteger sus ciudades de las grandes inundaciones (NOAMAN y EL QUOSY, 2017). En Helwan, a unos 30 km al sur de El Cairo, alrededor del 2700-2600 a. C. se construyó en el margen derecho del Nilo la presa de Al Kafara

(Sadd el-Kafara) para almacenar el agua de la inundación. Estos egipcios inventaron o adaptaron varias herramientas para ayudar a captar agua del Nilo y aportarla a los campos de cultivo.

El *shaduf*, aparato para elevar agua (fotografía 1.2) que ya estaba en uso en Mesopotamia, apareció en el Alto Egipto en algún momento después del 1500 a.C. En esa época, los agricultores egipcios cultivaban alrededor de 800.000 ha con las inundaciones del Nilo. La tecnología del *shaduf* permitió el riego de las tierras altas mediante el uso de aguas superficiales y subterráneas, no solo durante los períodos de inundación sino también durante el resto del año, incrementándose la superficie cultivada en un 10-15% en verano (NOAMAN y EL QUOSY, 2017). Posteriormente, la noria (*saqia*), que se introdujo en algún momento posterior al 325 a. C., podría haber producido un aumento similar, de modo que cuando Egipto se convirtió en un “granero” para el Imperio Romano, se cultivaban anualmente alrededor de 1 millón de ha. Más tarde, Arquímedes (c. 287 a.C. – c. 212 a.C.) inventó (o reinventó, ya que existen hipótesis de que ya era utilizado en el Antiguo Egipto) el *tanbour* durante su estancia en Alejandría, y lo denominó “tornillo de Arquímedes”.

Babilonia fue una ciudad ubicada en la Baja Mesopotamia, atravesada por el río Éufrates. Su fundación data de c. 2300 a.C., siendo una gran potencia militar bajo el rey Hammurabi, que gobernó desde aproximadamente 1792 hasta 1750 a.C. Hammurabi promulgó el código que lleva su nombre, consistente en un conjunto de leyes, en el que se unificaban los códigos existentes en las ciudades del imperio babilónico. El código de Hammurabi está grabado en una estela de diorita (de 2,25 m de altura por 0,5 m en su zona más ancha). En la parte superior, está representado en bajorrelieve, Hammurabi de pie, delante de un dios, posiblemente Marduk (dios de Babilonia) o Shamash (dios solar; MAROTO, 2014); debajo, en caracteres cuneiformes acadios, están inscritas las 282 leyes que regían la vida cotidiana. Es uno de los conjuntos de leyes más antiguos encontrados y mejor conservados (actualmente se conserva en el Museo del *Louvre*, en París; fotografía 1.2). En este código aparecen las primeras reglas escritas conocidas relacionadas con el riego y de la regulación del uso del agua que siguió al desarrollo inicial del riego en esa región. En este sentido, el código de la ley de Hammurabi introdujo tres conceptos clave que crearon las bases para la gestión colectiva del riego: (i) distribución proporcional, mediante la cual un agricultor recibe agua en proporción a la cantidad de tierra cultivada; (ii) definición de la responsabilidad del agricultor individual hacia la comunidad, protegiendo las secciones del canal en su propiedad, aceptando las reglas de la comunidad, como los turnos de agua y la responsabilidad

por daños causados a los vecinos, ya fuera debida a malicia o a negligencia; y (iii) la distribución del agua y la gestión del riego son responsabilidad colectiva de los agricultores. Como se verá en el capítulo II, el Tribunal de las Aguas se basa en estos conceptos.



*Fotografías 1.2. Cabeza de maza del rey escorpión (arriba izquierda; [www.google.com/search?q=maza+del+rey+escorpi%C3%B3n&source](http://www.google.com/search?q=maza+del+rey+escorpi%C3%B3n&source)). Estela del código de Hammurabi (arriba derecha) y detalle de su parte superior (centro izquierda). Shaduf. [debajo; Noaman y Quosy (2017)]*

La región floreció bajo el gobierno de Hammurabi. Se cree que los conocidos Jardines Colgantes de Babilonia, una de las Siete Maravillas del Mundo Antiguo, fueron construidos durante la dinastía neobabilónica, bajo el rey Nabucodonosor (c. 604-562 a.C.).



*Fotografías 1.3. Recreación de la ciudad de Babilonia (arriba izquierda), la muralla interior (arriba derecha) y el río Éufrates (debajo izquierda; <https://academiaplav.es/20-datos-curiosos-babilonia/>). Pintura representando una visión idealizada de los Jardines Colgantes de Babilonia; al fondo se distingue la Torre de Babel (debajo derecha; [https://es.wikipedia.org/wiki/Jardines\\_Colgantes\\_de\\_Babilonia](https://es.wikipedia.org/wiki/Jardines_Colgantes_de_Babilonia))*

Un sistema inteligente de recolección y conservación de agua en la agricultura, que probablemente se originó en el pasado en el norte de África, y fue utilizado por los agricultores tradicionales en todo el norte de África y el Cercano Oriente, es el “riego por jarras” (“*jar irrigation* o *pot irrigation*”), consistente en enterrar una jarra de arcilla llena de agua cerca de un árbol, en su fase inicial, de modo que se permita la difusión lenta de la humedad a las raíces. El recipiente ayuda a capturar y mantener la humedad en las capas superiores del suelo. Este sistema se utiliza todavía en la actualidad para el cultivo en dunas de arena en el sur de Marruecos. Todos estos sistemas agrícolas del desierto representan una evidencia general de un nivel de desarrollo bien establecido aproximadamente 1000 a. C., que alcanzó un grado alto de sofisticación en el llamado "Período Israelita III" (c. 850 - 600 a.C.). El uso de estos frascos porosos enterrados en el suelo puede ser considerado como el origen de los riegos localizados de alta frecuencia actuales.

Los egipcios intercambiaron conocimientos con minoicos, micénicos, griegos arcaicos y clásicos. Dada la escasez de agua desde la era minoica, los griegos desarrollaron prácticas de riego sofisticadas y prácticas generales de gestión del agua, mostrando un gran ingenio. Los proyectos de riego a gran escala de los periodos clásico y helenístico (c. 500 - 100 a. C.) se consideran menos relevantes, y consistieron en moldear el paisaje, transformando los terrenos accidentados y marginales en suelos llanos y fértiles, y en proporcionar agua a los campos. Posteriormente, los romanos heredaron tecnologías prehistóricas y las desarrollaron, ampliándolas e implementándolas tanto en áreas urbanas como rurales. Aunque como se ha visto anteriormente la agricultura de regadío más antigua tuvo lugar en el Fértil Creciente, los primeros ejemplos registrados de sistemas de drenaje y riego datan de los periodos clásico griego e imperial romano.

Desde el punto de vista tecnológico, la civilización Islámica fue compendiadora, como lo había sido la romana. Los árabes inventaron poco por sí mismos, pero preservaron, refinaron, desarrollaron e intensificaron las prácticas tecnológicas del mundo antiguo. Así como las ideas científicas helénicas se difundieron a través del idioma árabe, existió un proceso paralelo en la preservación y extensión de las antiguas técnicas agrícolas iraníes, babilonias y nabateas. Entre los historiadores existe un consenso (casi unánime) de que los actuales sistemas de riego españoles de Valencia, Murcia, Andalucía e islas Baleares son de origen musulmán.

## *1.2. DEFINICIÓN DE RIEGO*

Los objetivos principales del riego son suministrar la humedad necesaria para el crecimiento y desarrollo de las plantas (que incluye el transporte de nutrientes), y diluir (y en su caso lixiviar) las sales existentes en el suelo. Además, el riego produce unos efectos beneficiosos como es el crear un ambiente favorable para el crecimiento de las plantas (al hacer bajar las temperaturas de suelo y ambiente en verano, e impedir (o al menos retrasar) la bajada de las temperaturas hasta niveles críticos para las plantas en invierno, cuando existen problemas de heladas).

Mediante el riego se intenta suplir el déficit de humedad existente en muchas regiones a causa del desequilibrio entre la evapotranspiración de los cultivos y la precipitación atmosférica.

Puede concluirse que, el riego es el aporte artificial de agua al suelo, con el objetivo de suministrar la humedad necesaria para el desarrollo y el crecimiento de las plantas. Expresado de otra forma, el riego es la aplicación oportuna y uniforme de agua a un perfil del suelo para reponer en éste el agua consumida por los cultivos entre dos riegos consecutivos.

### *1.3. EXTENSIÓN DEL REGADÍO*

La superficie regada en el mundo ha aumentado constantemente; en el período 1950-1980 el incremento fue superior al 3% anual, mientras que a partir de esa fecha el incremento se redujo a un nivel inferior al 1%, cuando la población mundial estaba creciendo a un ritmo del 1,8% (STEWART y NIELSEN, 1990). La superficie regada en España en 2019 (3.758.003 ha; MAPA, 2019) aumentó un 2.85% respecto a la de 2016, confirmando la ligera tendencia al alza, algo inferior al 1%.

Según la FAO (FAO, 2018) en 2015 se regaron a nivel mundial 332.895.840 ha, de las cuales 15.821.000 correspondieron a África, 27.888.000 a América del Norte, 7.309.700 a América del Centro, 15.999.000 a América del Sur, 235.482.700 a Asia, 26.085.440 a Europa, y 3.261.300 a Oceanía. En la Unión Europea se regaron 18.690.390 ha, siendo Italia el país en el que se regó la mayor extensión (4.004.500 ha), seguido de España (3.923.000 ha) y Rumanía (3.149.000 ha).

Aproximadamente el 86% de la superficie regada en el mundo corresponde a riego por superficie, el 11% a riego por aspersión y el 3% a riego localizado (FAO, 2014). En España, según datos del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, en 2002 la superficie regada con riego localizado representaba el 8% de la superficie regada total (3.300.000 ha) frente al 66% de los riegos de gravedad y al 16% de la aspersión (10% de otros), mientras que en 2019 (MAPA, 2019) la superficie regada con riego localizado fue de 1.962.011 ha (representando el 52,21% del total), frente a 902.163 ha regadas por gravedad (el 24,01% del total), 572.219 ha por aspersión (15,22%) y 321.609 ha (8.56%) por aspersión automotriz.

### *1.4. INFORMACIÓN BÁSICA NECESARIA PARA PROYECTAR UNA PUESTA EN RIEGO*

Para proyectar correctamente el riego de una explotación es conveniente disponer de una cierta información básica.

### **1.4.1. Mapas**

Tanto para seleccionar el (los) método(s) de riego a utilizar como para subdividir la explotación en secciones, así como para proyectar las redes de riego y drenaje, es imprescindible la información suministrada por los mapas topográficos. En general parecen aconsejables planos a una escala 1:2.000 ó 1:2.500 con curvas de nivel distanciadas entre 0,2 y 1 m. según sea la pendiente del terreno.

También es imprescindible conocer la distribución espacial de las características del suelo, lo cual se encuentra en los mapas de clasificación en series y tipos de suelos. La serie de suelo se determina en base al perfil y la secuencia de los horizontes que lo componen, con sus características morfológicas y de comportamiento en cuanto a textura, profundidad, drenaje y contenido de fragmentos gruesos. El tipo de suelo se refiere a la textura del horizonte superficial, que es el que se “trabaja” en el laboreo (GRASSI, 1987).

### **1.4.2. Recursos de agua de la explotación**

Es evidente que para proyectar el riego de una explotación es necesario conocer el recurso de agua con que se cuenta, tanto en cantidad como en calidad. La cantidad de agua disponible por unidad de tiempo, es decir el caudal, puede delimitar la superficie a regar, y en algunos casos obliga a la elección de un método determinado (por ejemplo, riego localizado de alta frecuencia). En cuanto a la calidad del agua de riego existe abundante bibliografía con diversas clasificaciones. La calidad del agua es un factor muy importante a considerar; así por ejemplo en caso de utilizar aguas salinas, para evitar la acumulación de sales, se requiere un lavado y por tanto un mayor consumo de agua.

Existen numerosas clasificaciones sobre la calidad del agua de riego, la cual puede ser evaluada según criterios de salinidad, sodicidad y de toxicidad. Sin entrar en más detalles (por salirse de la finalidad de esta obra) en la tabla 1.1 se presentan las directrices de la FAO (AYERS y WESTCOT, 1987) para interpretar la calidad del agua para riego.

**Tabla 1.1. Directrices para interpretar la calidad del agua para el riego (AYERS y WESTCOT, 1987)**

PROBLEMA POTENCIAL			UNIDADES	GRADO DE RESTRICCIÓN DE USO		
				NINGUNA	LIGERA A MODERADA	SEVERA
<u>SALINIDAD</u> (afecta disponibilidad de agua para el cultivo) <sup>2</sup>	CEa		dS m <sup>-1</sup>	<0,7	0,7-3,0	>3,0
	TSS		mg L <sup>-1</sup>	<450	450-2000	>2000
<u>INFILTRACIÓN</u> (reduce infiltración; evaluar usando a la vez la CEa y el RAS) <sup>3</sup>	RAS =	0 - 3 y CEa =		>0,7	0,7-0,2	<0,2
	=	3 - 6 =		>1,2	1,2-0,3	<0,3
	=	6 - 12 =		>1,9	1,9-0,5	<0,5
	=	12 - 20 =		>2,9	2,9-1,3	<1,3
	=	20 - 40 =		>5,0	5,0-2,9	<2,9
<u>TOXICIDAD DE IONES ESPECÍFICOS</u> (afecta cultivos sensibles)	Sodio (Na) <sup>4</sup>	Riego por superficie	RAS	<3	3-9	>9
		Riego por aspersión	meq L <sup>-1</sup>	<3	>3	
	Cloro (Cl) <sup>4</sup>	Riego por superficie	meq L <sup>-1</sup>	<4	4-10	>10
		Riego por aspersión	meq L <sup>-1</sup>	<3	>3	
Boro (B)		mg L <sup>-1</sup>	<0,7	0,7-3,0	>3,0	
<u>VARIOS</u> (afecta cultivos sensibles)	Nitrógeno (NO <sub>3</sub> -N) <sup>5</sup>		mg L <sup>-1</sup>	<5	5-30	>30
	Bicarbonato (CO <sub>3</sub> H) (aspersión foliar únicamente)		mg L <sup>-1</sup>	<1,5	1,5-8,5	>8,5
	pH		Amplitud normal: 6,5-8,4			

<sup>1</sup> Fuente University of California Committee of Consultants 1974.

<sup>2</sup> CEa es la conductividad eléctrica del agua; expresada en dS m<sup>-1</sup> a 25°C. TSS, es el total de sólidos en solución, expresado en miligramos por litro (mg L<sup>-1</sup>).

<sup>3</sup> RAS es la relación de adsorción de sodio. Para un valor determinado del RAS, la velocidad de infiltración aumenta a medida que aumenta la salinidad. El problema potencial de infiltración debe evaluarse utilizando el RAS y la CEa.

<sup>4</sup> La mayoría de los cultivos arbóreos y plantas leñosas son sensibles al sodio y al cloro; en el caso de riego por superficie debe usarse los valores indicados. La mayor parte de los cultivos anuales no son sensibles; debiendo utilizarse otras tolerancias de salinidad. En el caso de riego por aspersión sobre el follaje, y humedad relativa por debajo del 30%, el sodio y el cloro pueden ser absorbidos por las hojas de cultivos sensibles, por lo que deben utilizarse otras tablas de interpretación.

<sup>5</sup> NO<sub>3</sub>-N es el nitrógeno en forma de nitrato, expresado en términos de nitrógeno elemental (en el caso de aguas residuales incluir el NH<sub>4</sub>-N y el N-orgánico).



## 2. EL SUELO COMO DEPÓSITO DE AGUA

### 2.1. DISPONIBILIDAD DE AGUA EN EL SUELO

De la simple observación de las condiciones naturales, se desprende el papel del suelo como regulador de la humedad. En efecto, mientras las plantas consumen agua de una manera continua, las lluvias no caen sino de una manera intermitente.

Si a pesar de esta aportación irregular de agua, las plantas pueden alimentarse de manera regular y proseguir sin interrupción su crecimiento normal, se lo deben al suelo. El suelo representa el papel de un depósito donde las plantas toman lo que necesitan.

Para conocer la capacidad de este depósito, así como el intervalo entre riegos, se necesita conocer previamente la disposición de los horizontes en el perfil, el espesor y la textura y estructura de los mismos, junto con la velocidad de agotamiento y en su caso la salinidad del suelo y/o del agua de riego.

Como máximo las plantas disponen en el suelo de la humedad comprendida entre la capacidad de campo (CC) y el punto de marchitamiento (PM), denominada agua útil (AU).

La capacidad de campo es el máximo<sup>o</sup> contenido de agua que puede retener un suelo en condiciones de libre drenaje, y se alcanza entre 24 y 72 horas después de haberse concluido el riego, según el tipo de suelo.

El punto de marchitamiento es el contenido de agua en el cual las plantas se marchitan de forma irreversible, es decir, que no se recuperan después de haber sido sometidas durante la noche a condiciones de un ambiente saturado de humedad.

Si bien la *CC* y el *PM* además de depender de la textura dependen de la estructura y de otros factores, con vistas a una simplificación práctica se han relacionado con la textura. En las tablas 1.2 y 1.3 se presentan los valores medios de varias propiedades físicas de los suelos, que deben ser utilizados con carácter orientativo, pues en la práctica los valores de las mediciones realizadas pueden diferir de los aquí propuestos, no obstante, son aplicables en la mayoría de los suelos (ISRAELSEN y HANSEN, 1979; KELLER y BLIESNER, 1990).

**Tabla 1.2. Resumen de las propiedades físicas del suelo (De ISRAELSEN y HANSEN, 1979)**

Textura del suelo	Espacio poroso (W; %)	Densidad ( $\rho_a$ ; g cm <sup>-3</sup> )	Capacidad de campo (Acc; %)	Marchitez permanente (Apm; %)	Humedad total utilizable <sup>1</sup>		
					Peso seco (%) (Acc - Apm)	Volumen (%) (Acc - Apm) $\rho_a$	cm m <sup>-1</sup>
Arenoso	38	1,65	9	4	5	8	8
	(32-42)	(1,55-1,80)	(6-12)	(2-6)	(4-6)	(6-10)	(7-10)
Franco-arenoso	43	1,50	14	6	8	12	12
	(40-47)	(1,40-1,60)	(10-18)	(4-8)	(6-10)	(9-15)	(9-15)
Franco	47	1,40	22	10	12	17	17
	(43-49)	(1,35-1,50)	(18-26)	(8-12)	(10-14)	(14-20)	(14-19)
Franco-arcilloso	49	1,33	27	18	14	19	19
	(47-51)	(1,30-1,40)	(23-31)	(11-15)	(12-16)	(16-22)	(17-22)
Arcilloso-arenoso	51	1,30	31	15	16	21	23
	(49-53)	(1,25-1,35)	(27-35)	(13-17)	(14-18)	(18-23)	(18-23)
Arcilloso	53	1,25	36	17	18	23	23
	(51-55)	(1,20-1,30)	(31-39)	(15-19)	(16-20)	(20-25)	(20-25)

**Nota:** Los intervalos normales son consignados entre paréntesis.

<sup>1</sup> La humedad fácilmente utilizable representa un 75% de la totalmente utilizable.

**Tabla 1.3. Valores extremos y promedio de la humedad total utilizable en suelos de diferentes texturas (adaptado de KELLER y BLIESNER, 1990)**

Textura del suelo	Clases texturales	Humedad total utilizable mm m <sup>-1</sup>	
		Valores extremos	Valor medio
Muy gruesa	Arenas muy gruesas	33 - 62	42
Gruesa	Arenosa y arenosa franca	62 - 104	83
Moderadamente gruesa	Franco arenosa	104 - 145	125
Media	Franca y franco limosa	125 - 192	167
Moderadamente fina	Franco arcillosa, franco arcillo limosa y franco arcillo arenosa	145 - 208	183
Fina	Arcillo arenosa, arcillo limosa y arcillosa	133 - 208	192
Turbas y estiércoles		167 - 250	208

En la figura 1.1. se presentan los valores de la *CC*, *PM* y *AU*, relacionados con diferentes texturas de suelo.

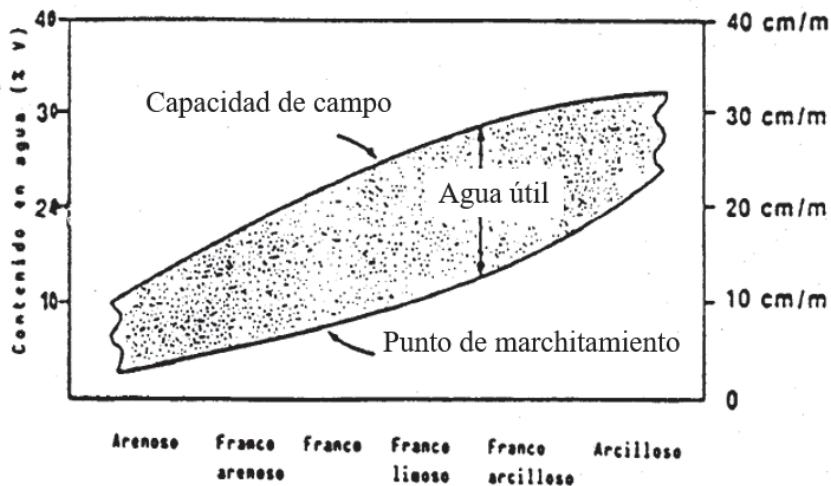


Figura 1.1. Valores representativos de agua útil para diferentes tipos de suelos.  
(Fuente: Walker y Skogerboe, 1987)

La capacidad de campo es un concepto definido de una forma imprecisa, pues el momento en que el suelo inicialmente saturado deja de perder agua por gravedad no está perfectamente determinado, ya que al principio el drenaje es muy rápido, pero con el paso del tiempo se vuelve muy lento. El potencial mátrico (que se estudia más adelante) correspondiente a la capacidad de campo oscila entre 1/10 y 1/3 de atm (10 – 30 kPa).

El punto de marchitamiento también está definido de una forma imprecisa, pues la marchitez además de depender del contenido de humedad del suelo, depende de la evapotranspiración exigida a las plantas por las condiciones meteorológicas, de la salinidad del suelo, de la potencia del sistema radical, etc. No obstante, la experiencia demuestra que su valor medio corresponde a 15 atm, pudiendo oscilar entre 10 y 20 atm. Lo cierto es que estas variaciones tan grandes de potencial mátrico tienen poca importancia, pues corresponden a variaciones muy pequeñas del contenido de agua.

En la figura 1.2. se presenta la distribución volumétrica de las tres fases del suelo: sólida, líquida y gaseosa.

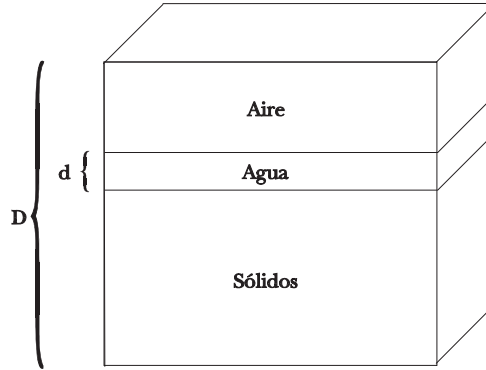


Figura 1.2. Esquema simplificado de una unidad de volumen del suelo

El contenido en agua expresado como porcentaje en volumen es:

$$A = \frac{d}{D} 100 \quad (1.1)$$

Por tanto, el agua útil ( $AU$ ; humedad comprendida entre la  $CC$  y el  $PM$ ) en un volumen de suelo  $D$ , se obtiene al despejar de la fórmula (1.1):

$$dt = \frac{Acc - Apm}{100} D \quad (1.2)$$

donde  $Acc$  es el contenido en agua a la capacidad de campo (% volumen) y  $Apm$  el contenido en agua al punto de marchitamiento (% volumen).

Si el suelo está formado por varios horizontes distintos, cada uno de volumen  $D_n$ ,  $AU$  se calcula de forma separada para cada horizonte, sumándose posteriormente los correspondientes a cada horizonte.

$$dt = \sum \left( \frac{Acc_n - Apm_n}{100} D_n \right) \quad (1.3)$$

El contenido en agua puede expresarse como porcentaje en peso, para lo cual basta multiplicar el numerador y denominador de (1.1) por sus respectivas densidades, es decir:

$$A' = \frac{d * 100}{D * \rho a} \quad (1.4)$$

siendo  $\rho a$  la densidad aparente del suelo ( $\text{g cm}^{-3}$ ), puesto que la densidad del agua es  $1 \text{ g cm}^{-3}$ . En este caso la expresión (1.2) y (1.3) quedarían respectivamente:

$$dt = \frac{A'cc - A'pm}{100} D * \rho a \quad (1.5)$$

$$dt = \sum \left( \frac{A'cc - A'pm}{100} D_n * \rho a_n \right) \quad (1.6)$$

donde  $A'cc$  ( $A'pm$ ) es el contenido en agua a la  $CC$  ( $PM$ ) expresado como porcentaje en peso.

Si los datos de  $AU$  se disponen en unidades de altura de agua/altura de suelo, (1.2) y (1.3) se convierten en (1.2') y (1.3'), siendo  $D$  y  $D_n$  los valores de las profundidades del suelo y de cada uno de los horizontes respectivamente.

$$dt = Au * D \quad (1.2')$$

$$dt = \sum (Au_n * D_n) \quad (1.3')$$

## 2.2. POTENCIAL HÍDRICO DEL SUELO

En cuanto a la extracción del agua del suelo por parte de las plantas, tan interesante como conocer el contenido de agua en el suelo es conocer la energía con que el agua es retenida, pues de nada sirve que un suelo contenga una gran cantidad de agua si las raíces de las plantas no son capaces de extraerla.

El agua del suelo está sometida a la acción de una serie de factores que tienden a retenerla o a expulsarla. El potencial hídrico del suelo (o potencial del agua del suelo) puede considerarse como la cantidad de trabajo que es necesario aplicar para transportar reversible e isotérmicamente la unidad de masa de agua desde una situación estándar de referencia hasta el punto de suelo considerado. Puede medirse en términos de trabajo dividido por masa (en cuyo caso se denomina potencial específico y se suele medir en julio  $\text{kg}^{-1}$  o ergio  $\text{g}^{-1}$ ), en términos de trabajo dividido

por volumen (potencial de presión, expresado en bar, atmósfera o kPa (1 bar = 0.987 atm = 100 kPa), o dividido por peso (potencial de peso, expresado en unidades de longitud; 1 bar = 10,20 mca (m de columna de agua).

El potencial hídrico del suelo ( $\psi$ ) tiene 4 componentes:

$$\psi = \psi_m + \psi_o + \psi_g + \psi_p \quad (1.7)$$

donde el potencial mátrico  $\psi_m$  está generado por los mecanismos de retención de agua por el suelo (adhesión y cohesión); dado que la presión que origina se opone a la expulsión del agua del suelo, toma siempre un valor negativo, de forma que cuanto más seco está un suelo, menor (mayor en valor absoluto) es  $\psi_m$ . Ahora bien, para evitar el signo negativo en algunas ocasiones, en lugar del  $\psi_m$  se habla de la tensión o succión mátrica, que es igual, pero con signo positivo.

Como se ha visto anteriormente, el potencial puede medirse como unidad de longitud (altura en cm de columna de agua), pero como su valor puede alcanzar valores absolutos muy elevados, Schofield definió en 1935 la escala " $pF$ ", que es el logaritmo en base decimal de la tensión del agua del suelo.

$$pF = \log (-\psi_m) \quad (1.8)$$

Ambos términos (tensión y  $pF$ ) están casi en desuso.

Para un mismo contenido de humedad, los distintos tipos de suelos retienen el agua con distinta energía, por tanto, la relación humedad-  $\psi_m$  varía para cada tipo de suelo. Las curvas de retención de humedad (curvas que expresan la relación humedad-  $\psi_m$ ) varían para cada tipo de suelo, como puede observarse en la figura 1.3. En abscisas se representa la fracción extraída del agua útil (en tanto por uno) al aplicar la succión ( $-\psi_m$ ) indicada en ordenadas. Se observa que las distintas curvas coinciden tanto para los valores de 0,1 atm ( $CC$ ) como de 15 atm ( $PM$ ).

Los tramos de las curvas más próximos a la horizontalidad se producen cuando a pequeñas diferencias de succión hídrica ( $-\psi_m$ ) corresponden grandes diferencias de humedad, lo cual quiere decir que en esos tramos hay muchos poros del mismo tamaño. En cambio, los tramos más verticales indican la existencia de pocos poros del mismo tamaño en los tramos correspondientes. Las inclinaciones próximas a 45° denotan la existencia de una distribución uniforme de los poros.

$\psi_o$  es el potencial osmótico. Como el agua del suelo es una solución salina puede dar lugar al fenómeno de ósmosis. Cuando dos soluciones de distinta concentración están separadas por una membrana semipermeable, se produce un movimiento del agua desde la solución más diluida hacia la más concentrada. Este movimiento de agua está originado por la presión osmótica, que equivale en magnitud al  $\psi_o$ .

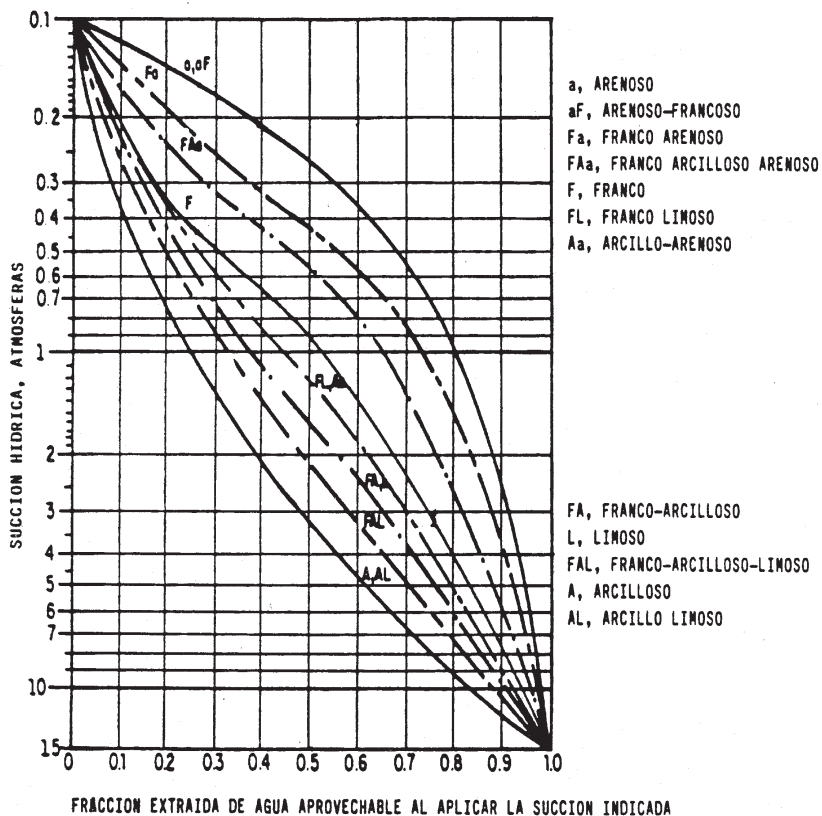


Figura 1.3. Relación entre la fracción de agua útil aprovechable y la succión aplicada al suelo, en función de la textura. (Fuente: GRASSI, 1987)

El potencial osmótico ( $\psi_o$ ) es directamente proporcional al número de moléculas de soluto:

$$\psi_o = -MRT \tag{1.9}$$

donde:

$\psi_o$  se expresa en atm.

$M$  es la molalidad (número de moles de soluto en 1.000 g de disolvente).

$R$  es la constante universal de los gases (0,0820 L atm g<sup>-1</sup> mol<sup>-1</sup>).

$T$  es la temperatura absoluta.

En la práctica el  $\psi_o$  puede determinarse en función de la presión de vapor o del descenso del punto de congelación del extracto de saturación (RAVINA, 1982), pero debido a la existencia de una estrecha relación entre la conductividad eléctrica y el  $\psi_o$  del extracto de saturación, es muy cómodo utilizar la relación obtenida empíricamente por Richards:

$$\psi_{oe} = -0,36 C E e \quad (1.10)$$

donde:

$\psi_o$  es el potencial osmótico del extracto de saturación, expresado en atm.

$C E e$  es la conductividad eléctrica del extracto de saturación en dS m<sup>-1</sup>.

La presión osmótica de la solución del suelo se obtiene a partir de la presión osmótica del extracto de saturación, por medio de una simple corrección proporcional, que viene dada por:

$$\psi_o = \frac{P_s}{\theta} \psi_{oe} \quad (1.11)$$

donde:

$\psi_o$  es el potencial osmótico de la solución del suelo.

$P_s$  es el porcentaje de saturación (%).

$\theta$  es la humedad (%) en las condiciones consideradas.

El potencial gravitacional ( $\psi_g$ ) es la energía debida a la altura geométrica del punto considerado respecto al plano de referencia.

El potencial de presión ( $\psi_p$ ) únicamente se presenta en los suelos saturados, y es el potencial correspondiente a la presión ejercida por el agua que satura el suelo.

En suelos saturados  $\psi_p$  tiene un valor determinado, mientras;  $\psi_m = 0$ ; en cambio en los suelos no saturados,  $\psi_p = 0$  y  $\psi_m$  tiene un valor no nulo.



### 2.3. FACTORES QUE AFECTAN A LA RETENCIÓN DE AGUA

\* **La textura** del suelo tiene un gran efecto sobre la capacidad de retención del agua por parte del suelo, dado que el agua es retenida en forma de película sobre la superficie de las partículas y en los pequeños poros existentes entre ellas. Por ello, los suelos con textura fina (arcillosa) que tienen un gran número de partículas con una gran superficie total, y que tienen un elevado volumen de pequeños poros distribuidos entre sus partículas, presentan una elevada retención de agua, mucho mayor que la correspondiente a la de los suelos con textura gruesa (arenosos). La superficie disponible para fijar el agua pasa de menos de  $1.000 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$  en arenas gruesas a más de  $1.000.000 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$  en las arcillas (KRAMER, 1974).

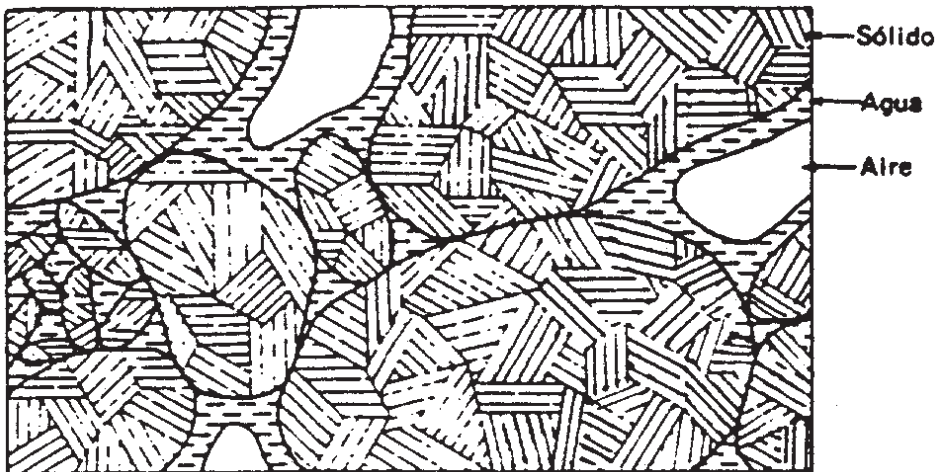


Figura 1.4. El agua del suelo almacenada en partículas alrededor de las partículas y llenando los poros pequeños de un suelo a capacidad de campo. (De THOMPSON y TROEH, 1980)

Además, las micelas de arcilla tienen carga negativa, causada principalmente por la sustitución de iones de aluminio y silicio por otros cationes de menor valencia dentro de la red cristalina, con lo cual estas cargas negativas se unen al polo positivo de las moléculas de agua, estableciendo un puente de hidrógeno.

\* **El tipo de arcilla** también influye en la retención de agua, tanto de un modo directo como de un modo indirecto. El efecto directo se debe a la capacidad de expansión y absorción interna de agua que presentan las diferentes arcillas; el indirecto es debido a la influencia de las diversas arcillas en la estructura del suelo.

- \* **La materia orgánica** también ejerce efectos de modo directo e indirecto. El directo porque es capaz de retener un peso de agua superior al suyo propio, mientras que el efecto indirecto se debe a su influencia sobre la estructura.
- \* **La estructura** tiene una gran importancia en la retención de agua, de forma que los suelos que presentan una buena estructura contienen un gran volumen de poros de todos los tamaños, tanto macroporos (que retienen mucho aire y poca agua y por tanto favorecen una buena aireación) como microporos (que retienen agua) presentando una elevada capacidad de retención de agua y una aireación adecuada. Así pues, los factores floclulantes de los coloides del suelo, como son un elevado contenido de materia orgánica, una proporción elevada de calcio en el complejo arcillo-húmico, un suelo salino, etc., proporcionan estabilidad a la estructura, redundando en una mayor retención de agua. En contra, los factores dispersantes, como por ejemplo una proporción elevada de sodio en el complejo arcillo-húmico, tienden a reducir la estabilidad estructural y por tanto a disminuir la retención de agua.

En la figura 1.5 se presenta la relación  $\theta - \Psi_m$  en un suelo con agregados y en un suelo compacto.

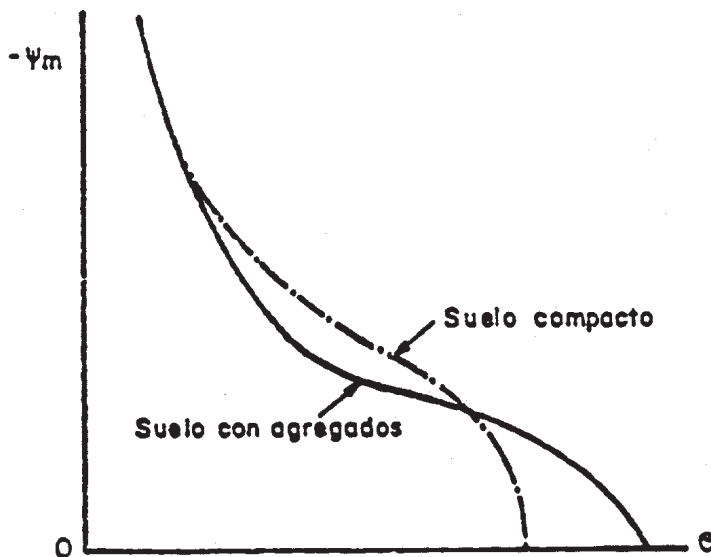


Figura 1.5. Relación humedad-potencial mátrico en un suelo con agregados y un suelo compacto

La importancia relativa de la textura y de la estructura varía con el  $\Psi_m$ , es decir con  $\theta$ . Cuando el  $\Psi_m$  se aproxima a cero (proximidad a la saturación) el efecto de la estructura domina sobre el de la textura (figura 1.5) y por tanto la humedad correspondiente debe medirse a partir de muestras inalteradas, mientras que para valores elevados (en valor absoluto) del  $\Psi_m$ , la humedad puede medirse en muestras alteradas.

#### 2.4. HISTÉRESIS

La relación entre el  $\Psi_m$  y el contenido en agua del suelo no es unívoca. Los poros del suelo son variables en forma y tamaño, conectándose unos con otros de diferentes maneras. Los poros grandes están aislados unos de otros por poros más pequeños, de manera que son los pequeños los primeros en llenarse cuando el suelo se está humedeciendo; pero estos poros al desecarse el suelo, no se vacían necesariamente en el orden inverso al que se llenan cuando el suelo se está humedeciendo; de hecho, para un mismo valor de  $\Psi_m$ ,  $\theta$  es mayor durante la desecación (desorción) que durante el humedecimiento (sorción). Este fenómeno se denomina histéresis y se representa en la figura 1.6. Si la relación suelo-agua se estudia para conocer el comportamiento del conjunto suelo-agua frente al sistema radical, debería considerarse el  $\psi_m$  correspondiente al desecado. Excelentes discusiones sobre histéresis pueden encontrarse en BAVER et al., (1972), HILLEL (1971) y NIELSEN et al., (1972).

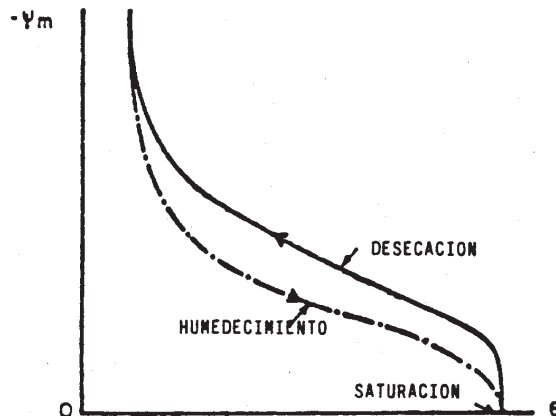


Figura 1.6. Relación humedad-potencial mátrico. Histéresis

## 2.5. MEDICIÓN DEL CONTENIDO POTENCIAL HÍDRICO Y DEL CONTENIDO DE AGUA DEL SUELO

El contenido de agua del suelo tiene gran importancia en la capacidad de retención de agua en el riego y en la velocidad de infiltración del agua en el mismo. Por otra parte, la disponibilidad real del agua en el suelo para las plantas depende del potencial hídrico.

CAMPBELL y MULLA (1990) realizaron un magnífico estudio sobre las ventajas e inconvenientes que presentan los distintos métodos para medir el contenido de agua en el suelo y del potencial hídrico. SAMPLE et al. (2016) resumen el funcionamiento de los sensores utilizados mayoritariamente en Virginia (USA) y los compara.

La medida del contenido hídrico del suelo puede realizarse directa o indirectamente. El método más utilizado para medir directamente el contenido hídrico del suelo es el método gravimétrico, mientras que entre los métodos para la medición indirecta destacan la sonda de neutrones, la reflectometría en el dominio del tiempo (*Time Domain Reflectometry*, TDR) y la reflectometría en el dominio de la frecuencia (*Frequency Domain Reflectometry*, FDR, junto a las sondas de capacitancia). Aunque menos utilizada y de más reciente introducción es la reflectometría en el dominio de la amplitud (*Amplitude Domain Reflectometer*; ADR).

Varios son los aparatos que se pueden utilizar para la determinación del potencial hídrico o de alguno de sus componentes, destacando los tensiómetros (miden la suma de los  $\Psi_m$  y  $\Psi_g$  gravitacional) y los sensores de matriz granular (bloques de yeso; que miden la suma del  $\Psi_m$  y del  $\Psi_o$ ). Los equipos de placa o membrana de presión permiten relacionar el contenido hídrico del suelo con el  $\Psi_m$ .

A continuación, se describen brevemente los considerados más importantes en la actualidad. La sonda de neutrones se basa en la dispersión de neutrones que se produce en el suelo. El equipo consta de un emisor y un detector de neutrones. El emisor emite neutrones rápidos, que al colisionar con átomos de H (cuanto mayor es el contenido de agua en el suelo, mayor es el número de colisiones) se desaceleran y se convierten en neutrones lentos, que son recibidos en el detector, el cual emite impulsos eléctricos que son medidos en medidor. Determina la humedad volumétrica con un error muy pequeño.

El equipo de TDR (fotografía 1.4) consiste en dos o tres varillas de acero inoxidable paralelas que se insertan en el suelo. Mide la constante dieléctrica a partir del tiempo de recorrido de un pulso electromagnético introducido en el suelo

**Para seguir leyendo, inicie el proceso de compra, [click aquí](#)**